



AICARR

Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria
Riscaldamento e Refrigerazione

■ *Convegno*

**LE MODERNE TECNOLOGIE
NEGLI IMPIANTI E NEI COMPONENTI
PER IL RISCALDAMENTO**

Padova 19 giugno 2003

Bari 26 settembre 2003

Catania 6 ottobre 2003



Climatizzazione ambientale con soffitto radiante

PAOLO BONDI* - FRANCESCO PICCININNI - PIETRO STEFANIZZI

Dipartimento di Fisica Tecnica, Politecnico di Bari

0. RIASSUNTO

La climatizzazione di ambienti con pannelli radianti consente di realizzare condizioni migliori di benessere con minori consumi energetici, rispetto ad altre soluzioni impiantistiche.

La migliore prestazione in termini di benessere è legata sia alla bassa velocità dell'aria nel locale, dal momento che il calore viene fornito all'ambiente soprattutto per irraggiamento, sia al fatto che l'ottimale valore della temperatura operativa viene raggiunto con una minore temperatura dell'aria che, di conseguenza, dà luogo a minori dispersioni di calore verso l'esterno nel caso di riscaldamento invernale.

Le condizioni operative caratterizzate da bassi valori di temperatura nei terminali di riscaldamento comportano anche una migliore efficienza del sistema di produzione del calore.

Nel lavoro si presentano i risultati provenienti da un monitoraggio sperimentale di un sistema di riscaldamento a pannelli radianti. L'impianto monitorato è situato in provincia di Bari ed utilizzato per la climatizzazione di un monolocale adibito ad ufficio.

Il sistema è costituito da pannelli radianti sospesi a soffitto alimentati da acqua calda (o refrigerata, in estate) prodotta da una pompa di calore a compressione di vapore.

Sono stati misurati i principali parametri significativi per la caratterizzazione delle condizioni di benessere termoisometrico nell'ambiente e delle condizioni termofluidodinamiche nello spazio climatizzato.

1. INTRODUZIONE

La climatizzazione con soffitto radiante consiste nel mantenere un'ampia superficie del soffitto a temperatura diversa da quella dell'aria ambiente (maggiore in inverno e minore in estate). Questa tecnica di climatizzazione ha subito una interessante diffusione negli ultimi anni ma non si può definire affatto recente. Le prime applicazioni risalgono all'ipocausto delle terme romane, dove le pareti venivano mantenute calde da aria circolante in intercapedini. All'inizio del secolo scorso è stato l'inglese Barker a brevettare un sistema di riscaldamento con pannelli a soffitto costituiti da lamiere di

acciaio collegate a tubi percorsi da acqua calda.

A parità di portata volumetrica, l'acqua è circa 4000 volte più efficiente dell'aria nel trasporto dell'energia termica. Questo è solo uno dei punti a favore dell'impianto di climatizzazione a pannelli radianti ad acqua. Ad esso si aggiunge la maggiore igienicità ambientale legata all'assenza di fastidiose correnti d'aria con minore diffusione nell'ambiente di polveri ed inquinanti e l'assenza di immissioni sonore legate ai sistemi di movimentazione dell'aria. Tutti questi vantaggi rendono il sistema di riscaldamento a soffitto radiante particolarmente indicato per uffici, ospedali, biblioteche, sale convegno ed in generale tutte quelle applicazioni che presentano particolari esigenze di igiene ambientale e ridotto inquinamento acustico.

La sensazione di benessere nell'ambiente climatizzato dipende dalla temperatura operativa, e quindi sia dalla temperatura dell'aria che da quella media radiante. Un aumento della temperatura media radiante realizzata negli impianti di riscaldamento con pannelli a soffitto consente una riduzione della temperatura dell'aria a parità di sensazione di benessere. Questo corrisponde ad una riduzione delle dispersioni di calore verso l'esterno con tutti i vantaggi conseguenti: risparmio energetico e minore inquinamento ambientale legato al processo di produzione dell'energia termica per il riscaldamento.

I pannelli radianti vengono alimentati con acqua a temperatura di 30-50°C. Risulta perciò possibile utilizzare sistemi ad alta efficienza per la produzione del calore quali pompe di calore, caldaie a condensazione o calore di recupero.

2. IMPIANTO A SOFFITTO RADIANTE

L'impianto monitorato è situato in provincia di Bari ed utilizzato per la climatizzazione di un monolocale adibito ad ufficio. Il locale, di superficie in pianta 28 m² e volume 98 m³ circa, è ricavato in un vecchio edificio con muratura portante in pietra e volta a botte. Esso si trova al primo piano, è circondato da ambienti non climatizzati da 5 lati e l'unica parete esterna presenta una porta-finestra di circa 2 m². Le pareti presentano uno spessore di circa 90 cm.

La collocazione del locale è tale da rendere trascurabile l'apporto gratuito di radiazione solare. Gli apporti gratuiti presenti sono l'illuminazione artificiale, le apparecchiature elettriche e le persone.

Il 70% circa del soffitto è occupato da una lastra radiante che è il risultato dell'assemblaggio di 9 pannelli radianti di dimensioni 1,5x1,2 m ciascuno.

I pannelli sono realizzati annegando una serpentina in polibutilene (diametro esterno 6 mm) tra una lastra di cartongesso ed una di polistirene espanso.

Lo schema idraulico è rilevabile dalla Fig. 1.

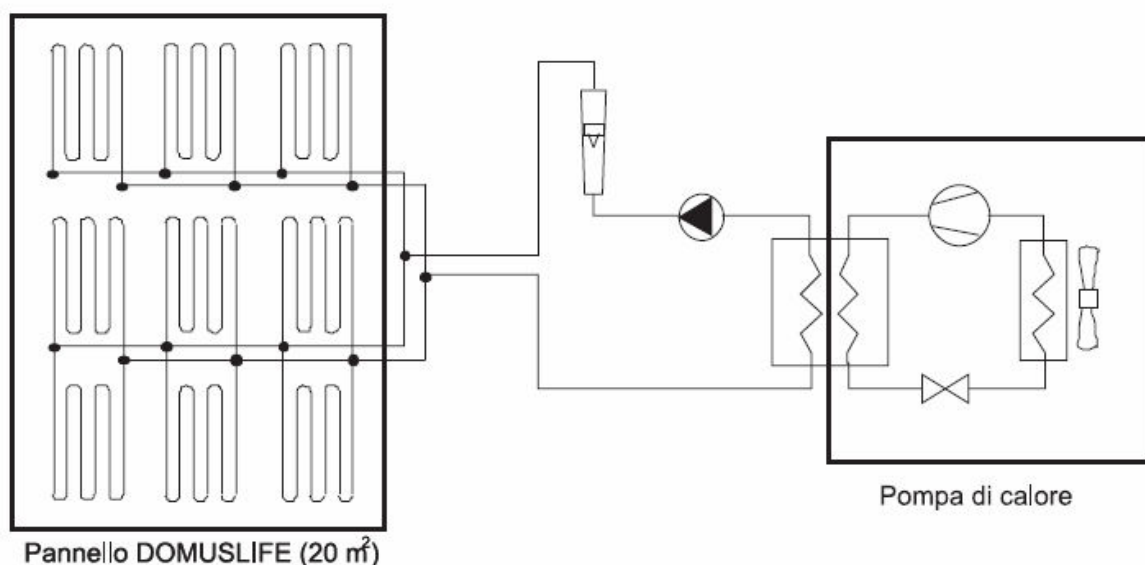


Fig. 1 – Schema dell'impianto monitorato.

Il fluido termovettore è acqua riscaldata, nel campo 35÷55°C, da una pompa di calore a compressione di vapore con valori nominali di COP pari a 2,41 e potenza termica 4,36 kW.

La regolazione (ON/OFF) è demandata ad una sonda termostatica ambiente che interviene sul funzionamento del compressore della pompa di calore.

La portata di acqua circolante è misurata con un flussimetro a galleggiante. Le temperature sono misurate con termocoppie rame-costantana (T).

Due termocoppie rilevano la temperatura superficiale dei tubi di rame di mandata e ritorno dell'acqua al pannello, in prossimità dell'innesto ai collettori di distribuzione dell'acqua alle serpentine.

Le altre termocoppie sono state utilizzate per misurare la temperatura della superficie interna della parete esterna, del pavimento, della superficie inferiore del pannello a soffitto, dell'aria esterna e dell'aria dell'ambiente interno a diverse altezze dal pavimento: 10, 60, 110 e 170 cm. Le termocoppie in aria sono state schermate dall'irraggiamento diretto con cilindretti di lamierino lucido.

Tutte le termocoppie sono state lette e registrate ogni 60 s da un computer attraverso l'acquisitore dati.



Fig. 2 – Strumentazione utilizzata nella sperimentazione.

Le condizioni di benessere realizzate sono state monitorate da una centralina microclimatica collocata ad un'altezza di 1,5 m dal pavimento (Fig. 2). I dati acquisiti ogni minuto sono stati elaborati successivamente con un software appositamente implementato in ambiente FORTRAN.

3. PRESTAZIONE ENERGETICA

L'innalzamento della temperatura media radiante provocato dal soffitto radiante consente di operare con temperature dell'aria interna dell'ambiente riscaldato più basse, ordinariamente 2-3°C inferiori ai 20°C di progetto. Questo porta a minori dispersioni termiche per trasmissione attraverso l'involucro e per ventilazione, valutabili in una riduzione del consumo energetico dell'ordine di 10-15%.

A questo vantaggio si deve aggiungere quello legato alla possibilità di utilizzare generatori di calore ad alta efficienza, tipo caldaie a condensazione e pompe di calore [1].

Per le pompe di calore l'efficienza aumenta al diminuire della temperatura dell'acqua calda mandata ai pannelli. Nella Fig. 3 si riporta l'andamento del COP per un ciclo di Carnot inverso in funzione delle temperature.

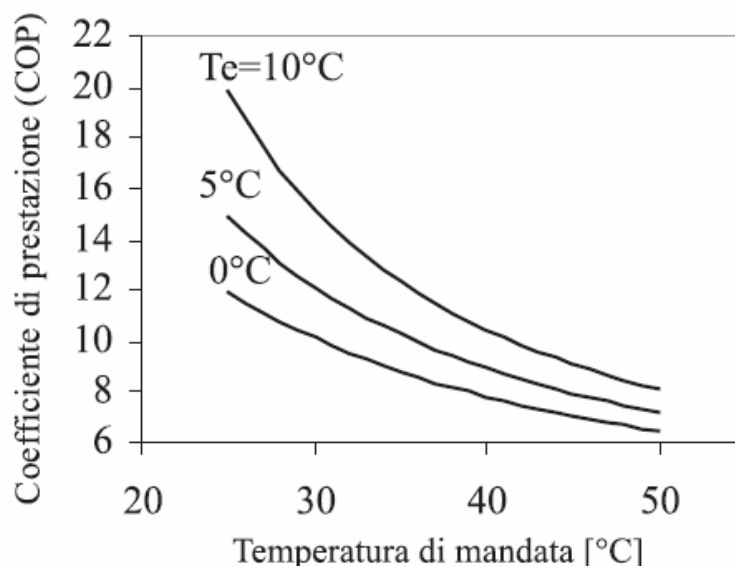


Fig. 3 – Andamento del COP teorico (di Carnot) per diversi valori della temperatura dell'aria esterna.

La previsione della prestazione energetica di un impianto a pannelli radianti richiede l'utilizzo di algoritmi di calcolo abbastanza complessi. In letteratura sono reperibili diversi metodi di simulazione del comportamento termoenergetico di questi impianti [2, 3, 4]. Ai fini della progettazione impiantistica la stima della potenza termica scambiata da pannelli radianti a soffitto avviene con riferimento a misure dirette in camera termostatica. I dati sperimentali vengono poi corretti, per regimi di funzionamento diversi da quelli di prova, con correlazioni reperibili in letteratura [5].

4. BENESSERE AMBIENTALE

L'indice di benessere per la descrizione di ambienti termici moderati più comunemente usato è il voto medio previsto (PMV) come definito nella norma UNI EN ISO 7730 [6]. Esso richiede la conoscenza della temperatura dell'aria e la sua velocità, la temperatura media radiante, l'umidità relativa, l'energia metabolica (in realtà potenza metabolica per unità di superficie corporea) e la resistenza termica dell'abbigliamento.

Ricerche recenti [7, 8] hanno messo in evidenza una scarsa capacità di previsione delle reali condizioni di benessere da parte del PMV come definito nella norma ISO. Si è evidenziata una discrepanza tra i valori calcolati e quelli sperimentali legata soprattutto alla difficile valutazione della potenza metabolica e della resistenza dell'abbigliamento. Una minore influenza è stata riscontrata invece da parte dell'umidità relativa e della velocità dell'aria.

Nelle Figg. 4 e 5 sono riportati gli andamenti del PMV e del PPD in funzione della resistenza termica dell'abbigliamento per un valore di potenza metabolica pari a 1,2 met, ed in funzione della potenza metabolica per un valore della resistenza di abbigliamento pari a 1,2 clo. In entrambi i casi si è considerata velocità dell'aria nulla, umidità relativa pari a 50% e potenza meccanica nulla.

Si nota una marcata sensibilità del modello alla variazione della potenza metabolica e della resistenza dell'abbigliamento. L'assenza di una accurata valutazione di questi parametri [9] può portare ad errori notevoli nella stima delle condizioni di benessere realizzate.

Gli indici PMV e PPD esprimono la sensazione di caldo o freddo per il corpo umano nel suo insieme. Esistono però situazioni di disagio legate anche ad un raffreddamento (o riscaldamento) di una sola parte del corpo. Una situazione di questo tipo si verifica in presenza di un'accentuata asimmetria della temperatura radiante o in una forte stratificazione termica dell'aria ambiente. La UNI EN ISO 7730 raccomanda, in

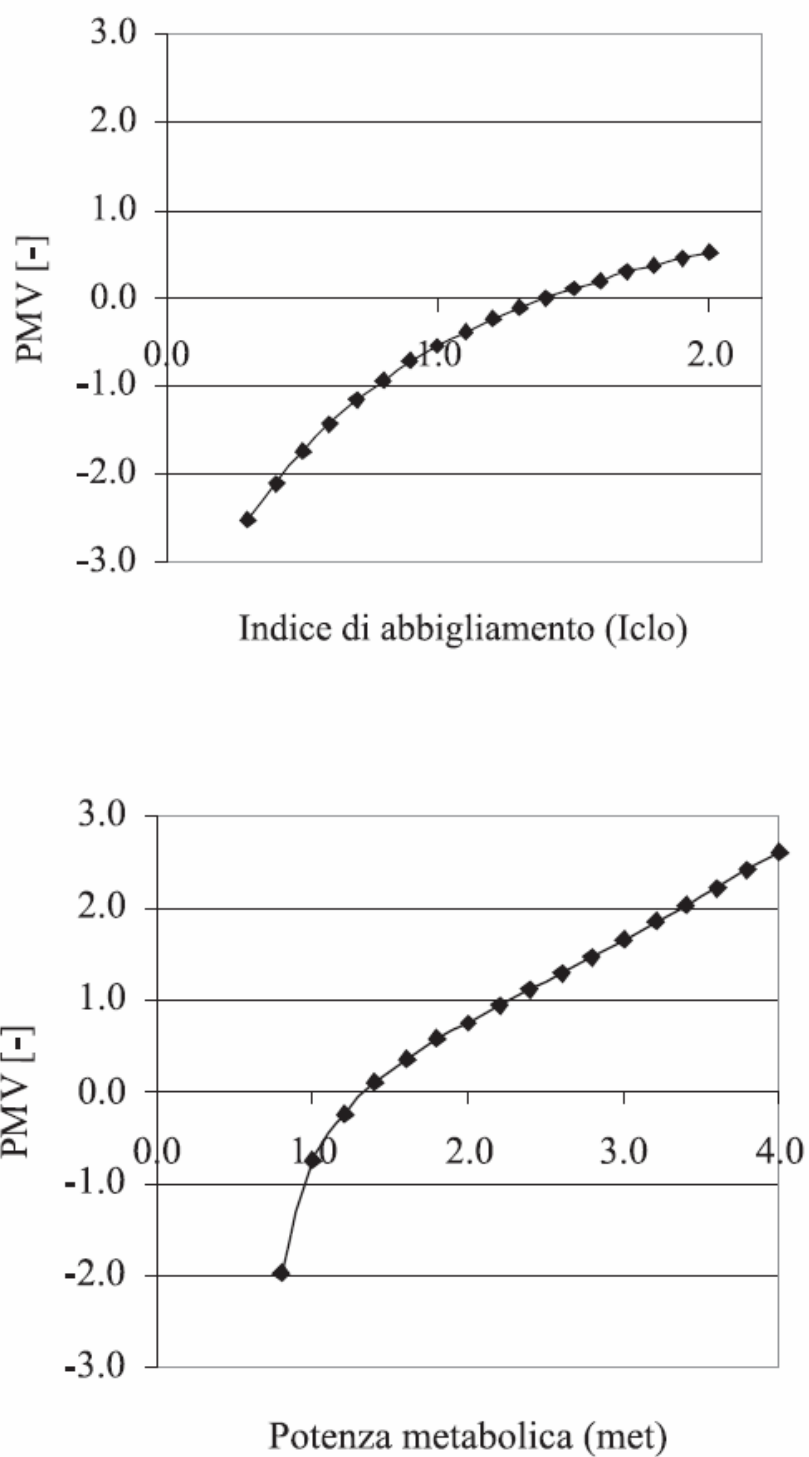


Fig. 4 – PMV in funzione dell'indice di abbigliamento (sopra) per $M = 1,2$ met, ed in funzione dell'energia metabolica (sotto) per $I_{clo} = 1,2$.

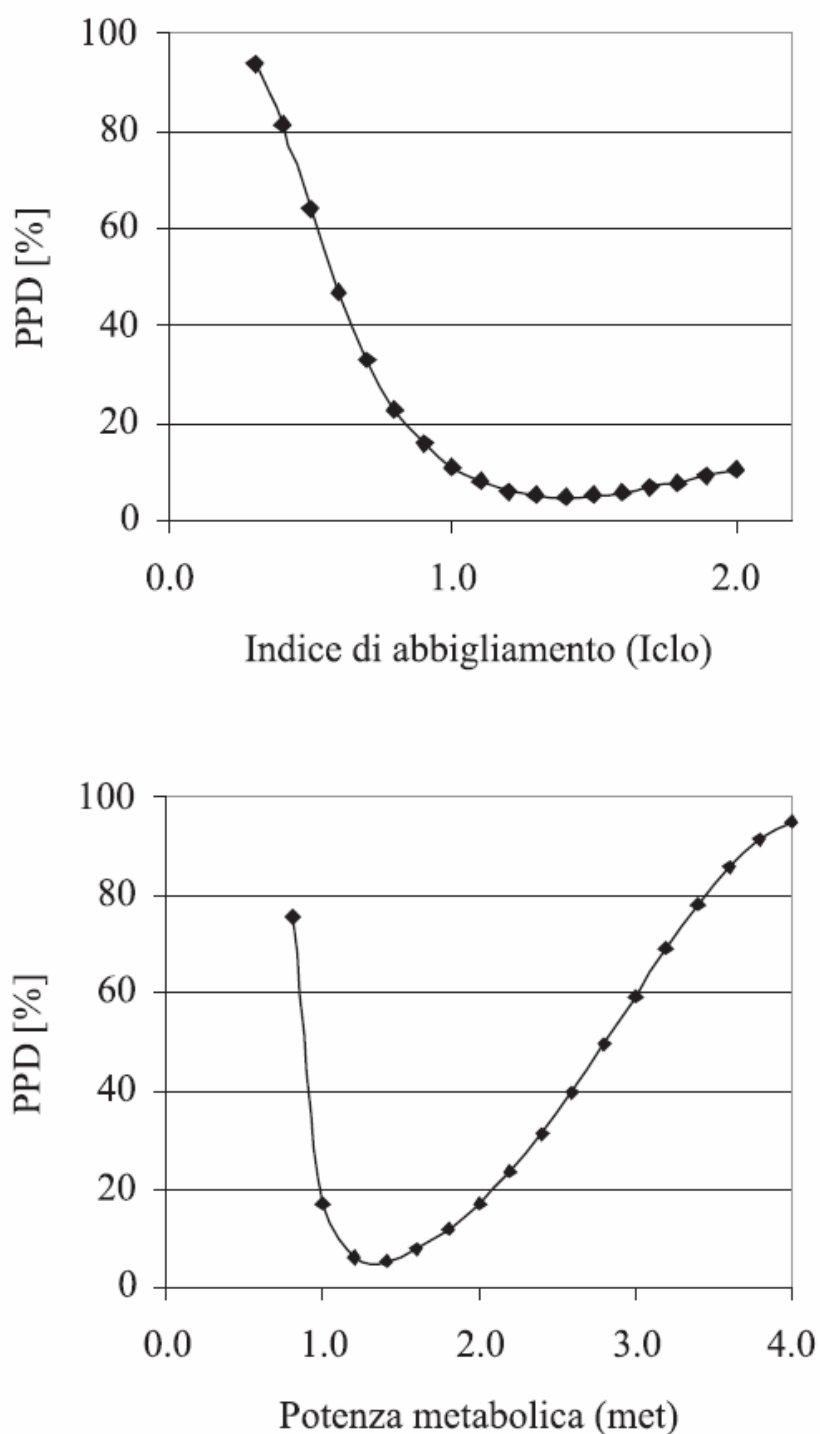


Fig. 5 – Percentuale di insoddisfatti in funzione dell'indice di abbigliamento (sopra) per $M = 1,2$ met, ed in funzione della potenza metabolica (sotto) per $I_{clo} = 1,2$.

condizioni invernali, una differenza verticale di temperatura dell'aria tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento (corrispondenti al livello testa e caviglia) minore di 3°C, ed una asimmetria della temperatura radiante dovuta al soffitto caldo minore di 5°C. Questa

asimmetria va misurata rispetto ad un piccolo elemento piano orizzontale posto a 0,6 m dal pavimento.

In regime di raffreddamento invece la norma non raccomanda valori limite per l'asimmetria radiante dovuta al soffitto freddo, in quanto studi sperimentali [10] hanno dimostrato che un'asimmetria verticale fino a 14°C non produce sensibile variazione della sensazione di benessere (Fig. 6).

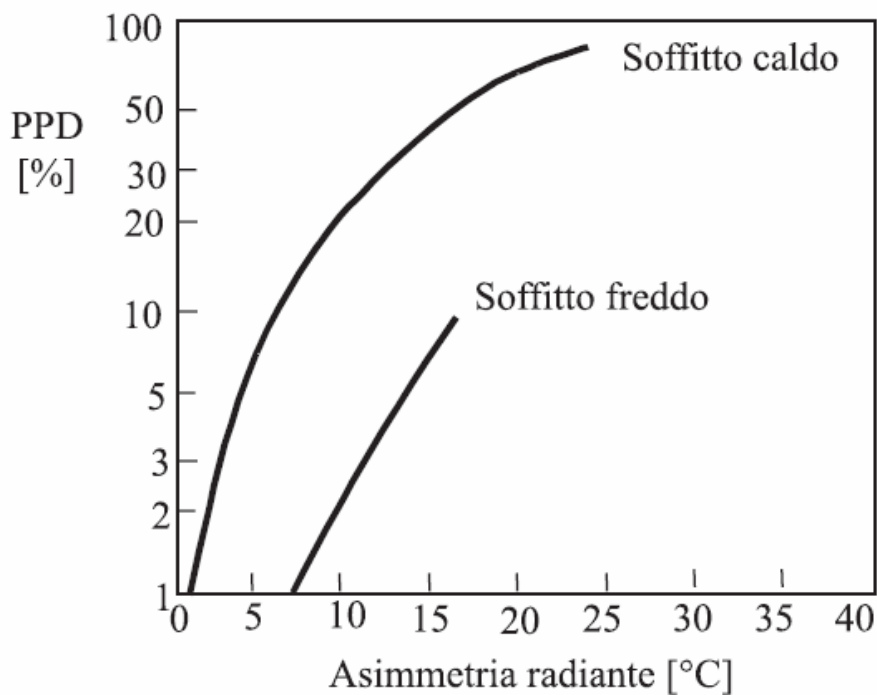


Fig. 6 – Percentuale di insoddisfatti per asimmetria radiante.

5. RISULTATI SPERIMENTALI

L'impianto è stato monitorato rilevando le grandezze necessarie a qualificare la sua prestazione ai fini del benessere termoisgrometrico e del consumo energetico. In Fig. 7 si riporta l'andamento di alcune temperature rilevate in corrispondenza di una temperatura di mandata al pannello di 40°C. In Fig. 8 si riportano le corrispondenti temperature per una temperatura di mandata di 35°C.

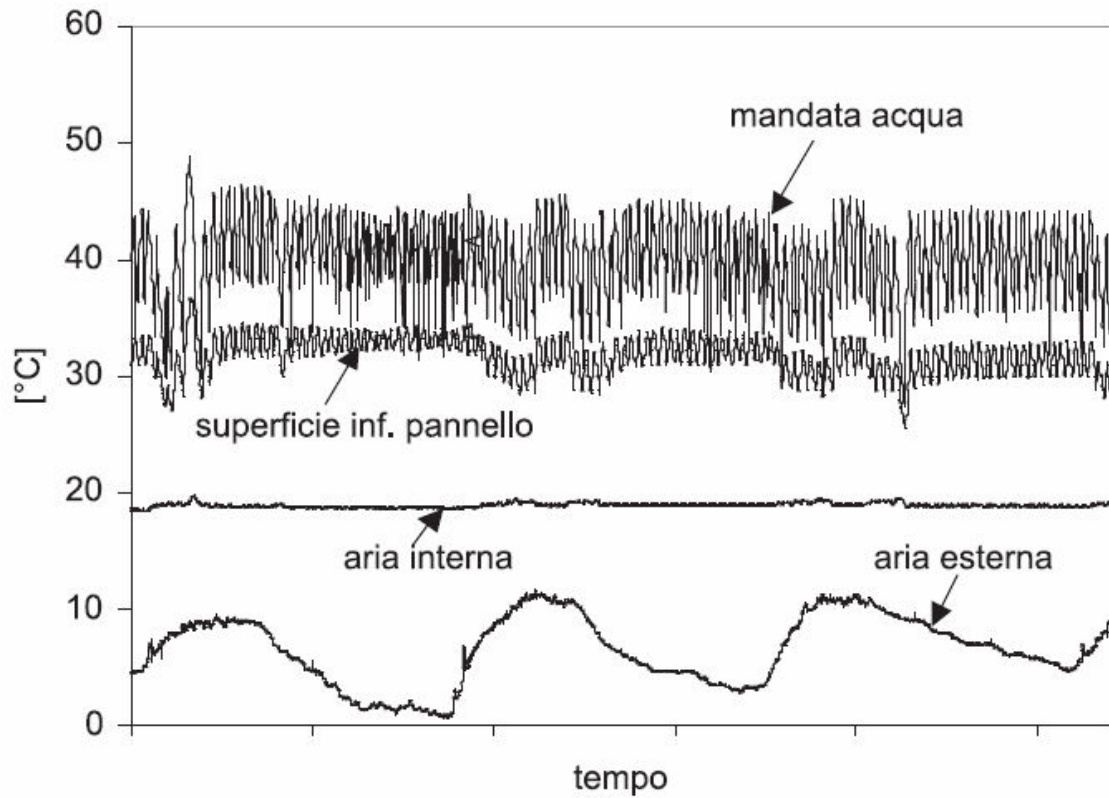


Fig. 7 – Regime termico con termostato pompa di calore su 40°C (6:16 25/02/03 - 9:30 28/02/03).

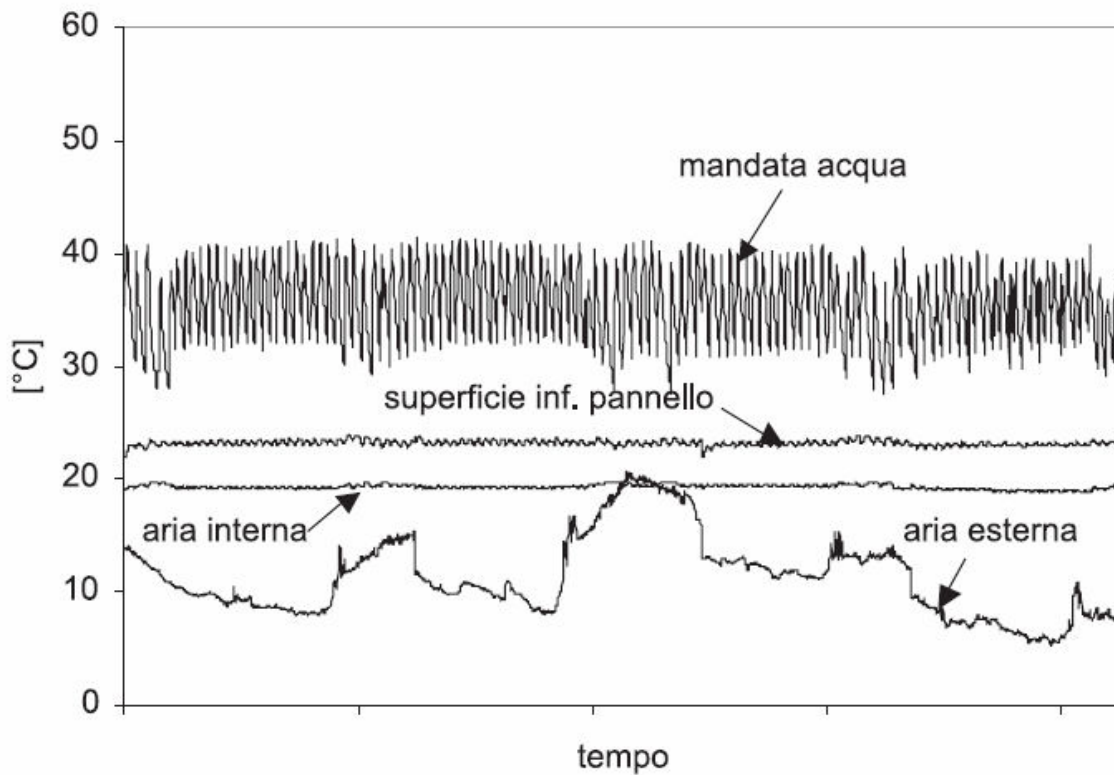


Fig. 8 – Regime termico con termostato pompa di calore su 35°C (14:20 10/03/03 - 10:50 14/03/03).

Le termocoppie collocate a diverse altezze al centro del locale hanno consentito di monitorare il fenomeno della stratificazione termica nell'aria ambiente. In Fig. 9 è riportata una distribuzione tipica della temperatura alle varie altezze.

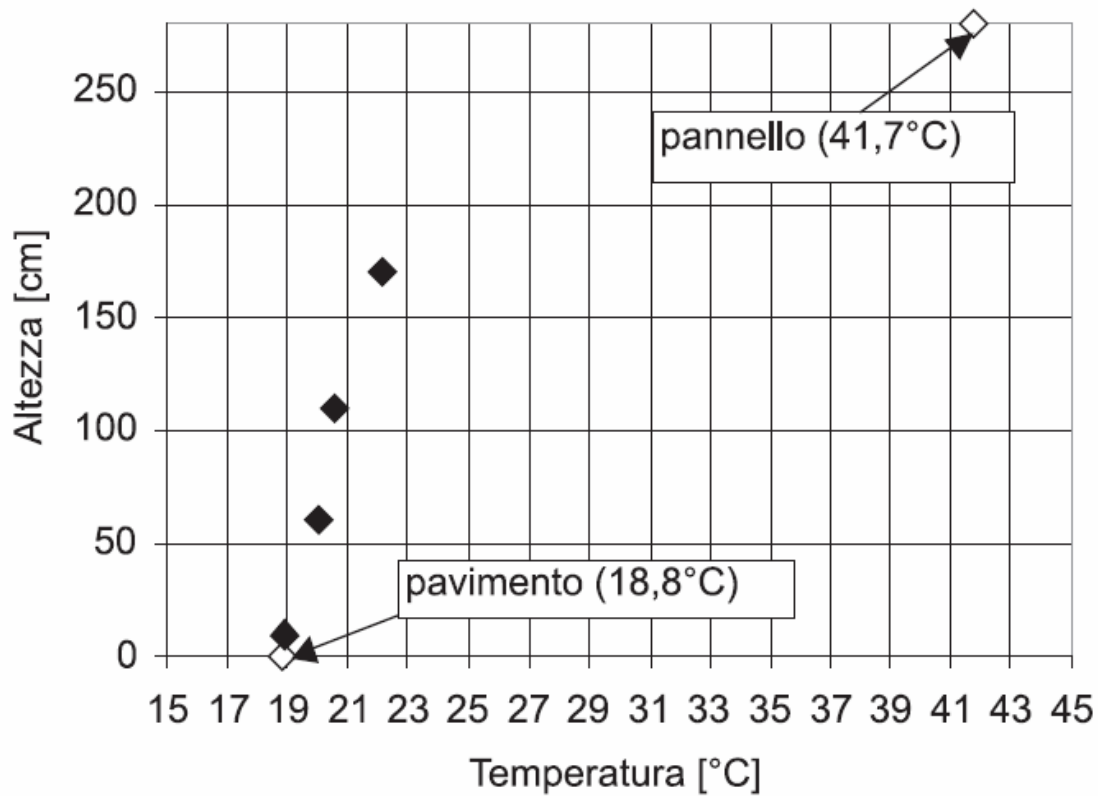


Fig. 9 – Stratificazione termica tipica nell'aria in direzione verticale.

La centralina microclimatica utilizzata ha permesso di rilevare, con intervallo di scansione di 10 minuti, le seguenti grandezze: temperatura al bulbo secco, temperatura al bulbo umido, umidità relativa, temperatura al globotermometro, asimmetria della temperatura radiante piana e velocità dell'aria.

L'umidità relativa dell'aria interna è risultata variabile nel campo 40÷50%, mentre la velocità dell'aria è risultata sempre inferiore a 0,1 m/s.

In Fig. 10 è riportato l'andamento dell'asimmetria della temperatura radiante piana in direzione verticale.

Dalle grandezze rilevate ed utilizzando l'algoritmo riportato sulla UNI EN ISO 7730 è stato possibile valutare il benessere termoigrometrico conseguito nell'ambiente climatizzato attraverso il calcolo degli indici PMV e PPD. In Fig. 11 è riportato l'andamento di tali indici nel periodo di misura.

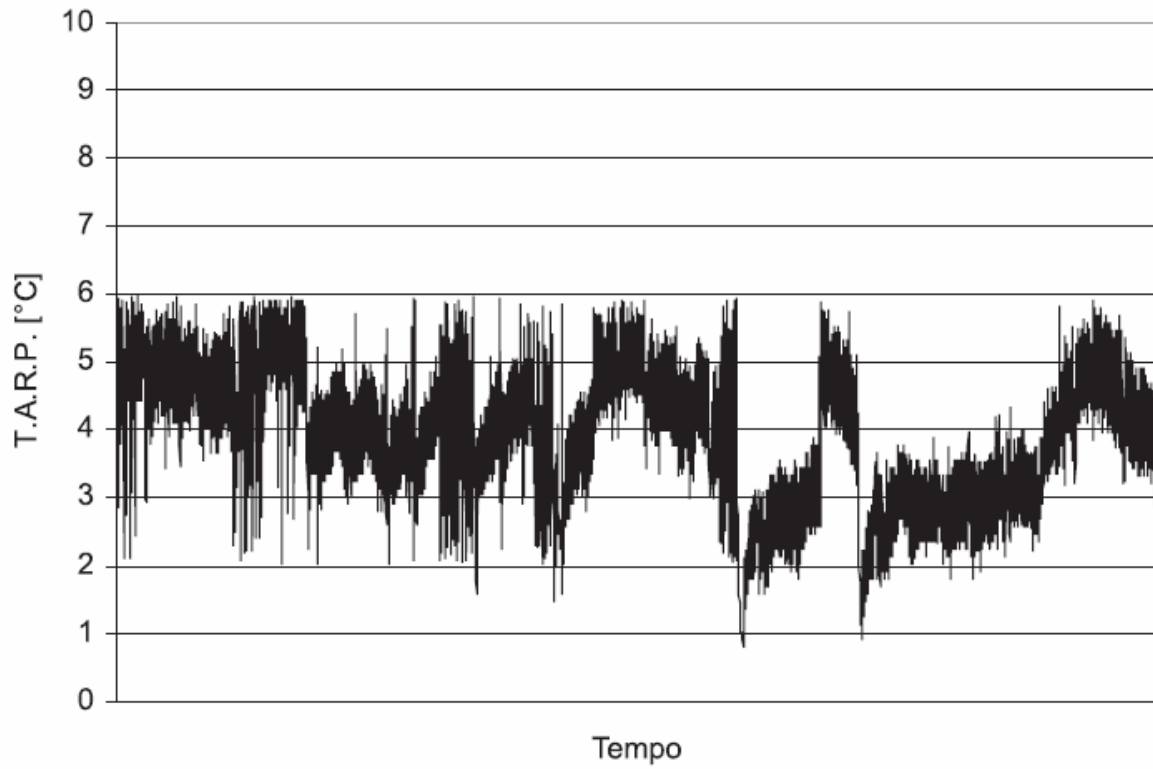


Fig. 10 – Asimmetria della temperatura radiante piana (in direzione verticale). (03/03/03 - 11/04/03)

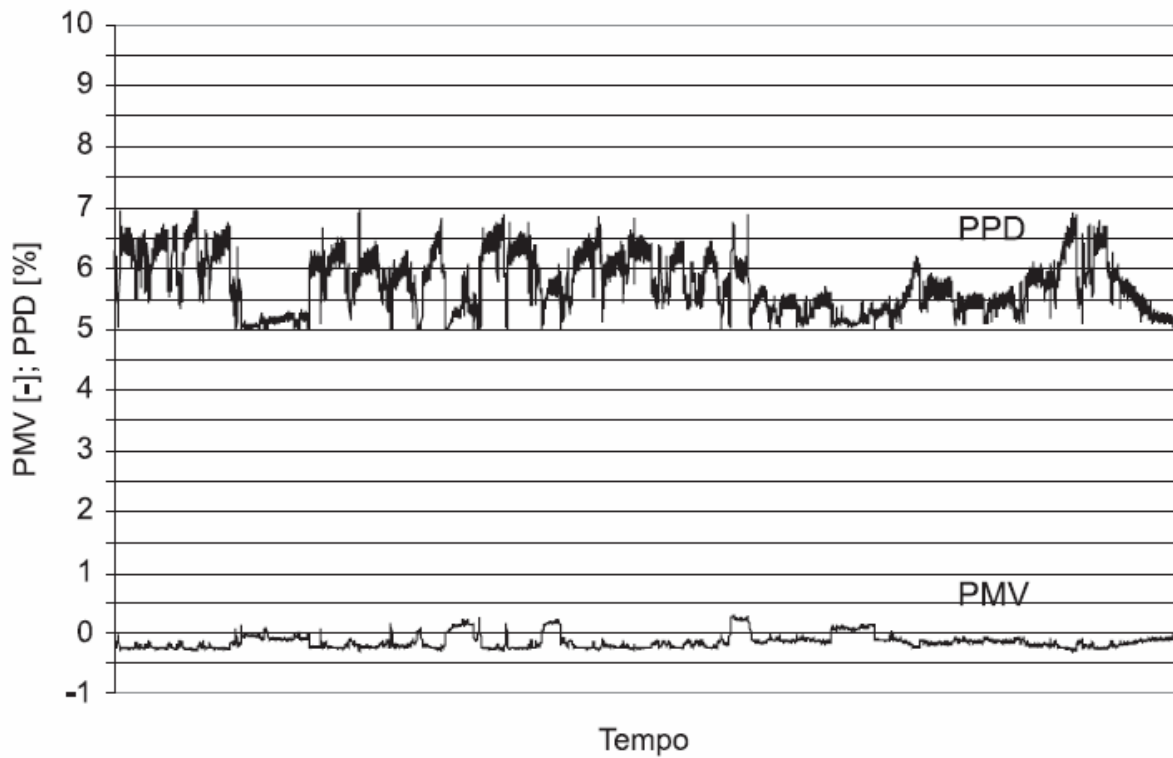


Fig. 11 – Andamento del PMV e del PPD nel periodo di misura.
 $I_{clo} = 1,2; Met = 1,2; W = 0.$ (03/03/03 - 11/04/03)

6. CONCLUSIONI

La climatizzazione con soffitto radiante si presenta come una valida scelta impiantistica in grado di assicurare ottime condizioni di benessere con un apprezzabile risparmio energetico. L'impianto di riscaldamento monitorato, del tipo a pannelli radianti prefabbricati sospesi a soffitto, è stato in grado di assicurare condizioni di benessere all'interno di un locale adibito ad ufficio in tutto il tempo di funzionamento. Le condizioni ottimali sono state assicurate con una temperatura dell'aria ambiente intorno a 18°C con una riduzione delle dispersioni di calore verso l'esterno intorno al 10-15% rispetto a sistemi di riscaldamento convenzionali realizzanti temperature medie dell'aria di 20-21°C.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Ditta IDROTECNOCLIMA di Sannicandro di Bari per la collaborazione nella sperimentazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lazzarin, R.M., Crose, D., *Il soffitto radiante nella climatizzazione ambientale*, SGE, Padova, 2000.
- [2] Stetiu, C., *Radiant cooling in US office buildings: Towards eliminating the perception of climate-imposed barriers*, Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1998.
- [3] Corgnati, S. P., Fracastoro, G. V., Perino, M., *Un metodo di calcolo per il dimensionamento dei soffitti radianti per il raffrescamento estivo*, CDA, n. 7, 731-741, 2000.
- [4] Watson, R.D., Chapman, K.S., *Radiant heating and cooling handbook*, McGraw Hill, 2001.
- [5] Marchesi, R., *Una metodologia per la predizione del calore scambiato dai pannelli radianti a soffitto*, *La Termotecnica*, ottobre 2002, 91-96.
- [6] UNI EN ISO 7730, *Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*, 1997.
- [7] Humphreys, M. A., Nicol, J. F., *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments*, *Energy and Buildings*, 34 (2002), 667-684.
- [8] Olesen, B.W., Parsons, K.C., *Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730*, *Energy and Buildings* 34 (2002), 537-548.
- [9] Havenith, G., Holmér, I., Parsons, K., *Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production*, *Energy and Buildings* 34 (2002), 581-591.
- [10] ASHRAE, *Fundamentals Handbook*, 1997.